

Крючков А. І., к.т.н., доц.,
Бахтин А.І., асп.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОЦІНКА СПЕКТРАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ СЕЙСМІЧНИХ КОЛИВАНЬ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОХОРОНЯЮТЬСЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МАСОВИХ ВИБУХІВ НА КАР'ЄРАХ

Kryuchkov A.I. Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.,
Bakhtyn A.I., PhD student
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ASSESSMENT OF THE SPECTRAL COMPONENT OF SEISMIC VIBRATIONS OF PROTECTED OBJECTS DURING EXPLOSIONS IN ROCK QUARRIES

Метою цієї роботи є дослідження дисипації та розподілу енергії вибухових імпульсів при проходженні їх через гірський масив, фундамент та основні конструкції об'єктів, що охороняються.

У ході аналітичних та експериментальних досліджень встановлені автоковаріаційні функції та енергетичні автоспектри вхідного та вихідного імпульсів хвиль деформації для системи «грунт – фундамент» та «фундамент – вершина вежі». Проаналізовано зміну амплітуди та енергії сейсмічних коливань при проходженні вибухового імпульсу через фундамент та основні конструкції дослідного об'єкту. Виявлено діапазон резонансних частот сейсмічних коливань ґрунтового масиву та фундаменту дослідної конструкції. В цьому діапазоні, частота коливань фундаменту дослідного об'єкта близька до частоти коливань вхідного імпульсу, що призводить до збільшення енергії та амплітуди сейсмічних коливань та утворення у фундаменті мікротріщин. Встановлено зниження амплітуди та енергії сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) для системи «грунт – фундамент» та зростання коливань на вершині вежі.

Досліджено стійкість системи та умови розвитку мікротріщин за допомогою фазово-амплітудної характеристики взаємного енергетичного спектра (годографа). Характер та форма фазово-амплітудних характеристик взаємних спектрів (годографи) вказує на те, що дослідна система «джерело вибуху-ґрунтовий масив-фундамент-силові вежі» нестійка і частина енергії витрачається на утворення мікротріщин.

Використана в роботі методика досліджень характеристик гірського масиву та об'єктів, що охороняються, свідчить про можливість більш детального вивчення механізму розвитку мікротріщин та їх переходу до нестійкого руйнування.

Практична цінність результатів роботи полягає в отриманні інформації для захисту дослідних об'єктів від негативного та руйнівного впливу сейсмічних імпульсів, а також можливості впливу на потоки та дисипацію енергії вибухових імпульсів за рахунок зміни параметрів вибуху або інших інженерних рішень.

Ключові слова: автоковаріаційна функція; енергетичний автоспектр; частота; амплітуда; фундамент; ґрунтовий масив; швидкість зміщення.

ВСТУП

Актуальність теми. Вивчення особливостей проходження пружних хвиль, їх швидкості, амплітуди та енергії є важливим питанням для оцінки сейсмічної безпеки об'єктів, що охороняються. Масові вибухи на кар'єрах здатні створювати загрозу багатофакторного ураження не лише на місці вибуху, але і на значних відстанях від нього. Враховуючи це особливо актуальним є питання збереження стійкості бортів кар'єру та будівель неподалік від нього.

Під час розповсюдження сейсмічної хвилі від місця вибуху до об'єктів, що охороняються, основна частина її енергії зосереджена в доволі вузькому діапазоні частотного спектра коливань. Параметри які впливають на формування цього спектру залежать від геолого-морфологічної будови, термодинамічних параметрів ділянки ґрунтового масиву, що розглядається, а також від технологічних параметрів вибуху [1, 2].

Під час масового вибуху заряду виникає певний невеликий землетрус, гіпоцентр якого знаходиться в місці закладання заряду. Під дією вибухового імпульсу в породі виникає хвиля деформації, яка в свою чергу призводить до коливань ґрунтового масиву та об'єктів, що охороняються.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основними параметрами вибухового імпульсу в гірничій справі прийнято вважати максимальне значення напруження та тривалість дії імпульсу. Керування вибуховим імпульсом здійснюється за рахунок зміни цих параметрів. Незважаючи на те, що інформація про ці характеристики є корисною її не достатньо для точного передбачення дії вибуху в гірському масиві на об'єктах, що охороняються. Знань про ці параметри вибухового імпульсу для оцінки дії вибухових хвиль, розкриття фізичної сутності управління їх параметрами та обґрунтованої розробки вибухових технологій не достатньо [3]. Таку інформацію дають спектральні характеристики вибухових процесів [4 - 6]. Залученню теорії спектрів для дослідження вибухових явищ присвячені деякі роботи [3, 7, 8, 9] в яких підтверджено ефективність спектрального аналізу при вивченні дії вибуху в різних середовищах.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження дисипації та розподілу енергії вибухових імпульсів при проходженні їх через гірський масив та фундамент об'єктів, що охороняються. Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити ряд наукових задач: 1) дослідження автоковаріаційних функцій та автоспектрів вхідного та вихідного імпульсів хвиль деформації; 2) оцінка амплітуди та енергії сейсмічних коливань при проходженні вибухового імпульсу через фундамент та силосні вежі; 3) встановлення резонансних частот сейсмічних коливань ґрунтового масиву, фундаменту та силосних веж дослідного об'єкту; 4) аналіз стійкості системи та умов розвитку мікротріщин за допомогою фазово-амплітудної характеристики взаємного енергетичного спектра.

Цементні, каменедробильні та інші заводи як правило розміщуються неподалік кар'єрів для видобутку сировини. Проведення масових вибухів впливає на сейсмостійкість цих технологічних об'єктів. Як приклад в даній роботі розглядається один із майже типових випадків: на відстані 600 та 1800 м від цементного заводу знаходяться два діючих кар'єра на яких здійснюються періодичні масові вибухи. Висота кожної із чотирьох силосних веж становить 43 м, діаметр – 12 м, корисний об'єм – 4400 т цементу. Вежі об'єднані в один блок та розміщені на цементобетонній фундаментній плиті 27×27×2 м. Під впливом періодичних масових вибухів ґрунт під

фундаментом силосних веж почав деформуватися, що призвело до просідання фундаменту, зміщення центру маси споруди та утворення моменту сил, що в свою чергу збільшило навантаження на фундамент. Цей факт змушує переглянути допустимі динамічні навантаження та визначити умови безпечних сейсмічних коливань.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для оцінки впливу характеристик фундаменту дослідного об'єкту на спектральний склад сейсмічних коливань конструкції використані експериментальні заміри зміщень (u) по осі X на поверхні ґрунту (70 м від фундаменту), вершині фундаменту та вершині однієї з веж [10].

Критерій стійкості об'єкта, що охороняється залежить від швидкості зміщення (\dot{u}). За допустиме динамічне навантаження на силосні вежі була прийнята швидкість зміщення по одній з компонент – 0,2 см/с [10]. Враховуючи це, були перераховано сейсмограми зміщення (u) [10] у сейсмограми швидкості деформації (рис. 1).

Припустимо, що цифрові дані \dot{u}_t , $t = 0, \dots, N$ (N – кількість дискретних точок вибірки) відповідає значенням сигналу $\dot{u}(t)$ відрхованого через однакові інтервали. Позначимо швидкість зміщення вхідного імпульсу (коливання ґрунту на відстані 70 м від фундаменту) \dot{u}_g , а вихідного (вершина фундаменту) через \dot{u}_f для системи «ґрунт – фундамент». В свою чергу для системи «фундамент – вершина вежі» сигнал на вершині фундаменту \dot{u}_f буде вхідним, а сигнал на вершині вежі вихідним, позначимо його через \dot{u}_e . Вибіркова оцінка коваріаційної функції в цьому випадку буде мати вигляд [11] (рис. 2):

$$c_g(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} \left[(\dot{u}_{gt} - \overline{\dot{u}_g}) (\dot{u}_{gt+k} - \overline{\dot{u}_g}) \right]; \quad (1)$$

$$c_f(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} \left[(\dot{u}_{ft} - \overline{\dot{u}_f}) (\dot{u}_{ft+k} - \overline{\dot{u}_f}) \right]; \quad (2)$$

$$c_e(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} \left[(\dot{u}_{et} - \overline{\dot{u}_e}) (\dot{u}_{et+k} - \overline{\dot{u}_e}) \right]; \quad (3)$$

де $c_g(k)$, $c_f(k)$, $c_e(k)$ – вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій швидкості зміщення частинок під дією вибухового імпульсу ґрунту на відстані 70 м від фундаменту, поверхні фундаменту та вершини однієї з веж відповідно.

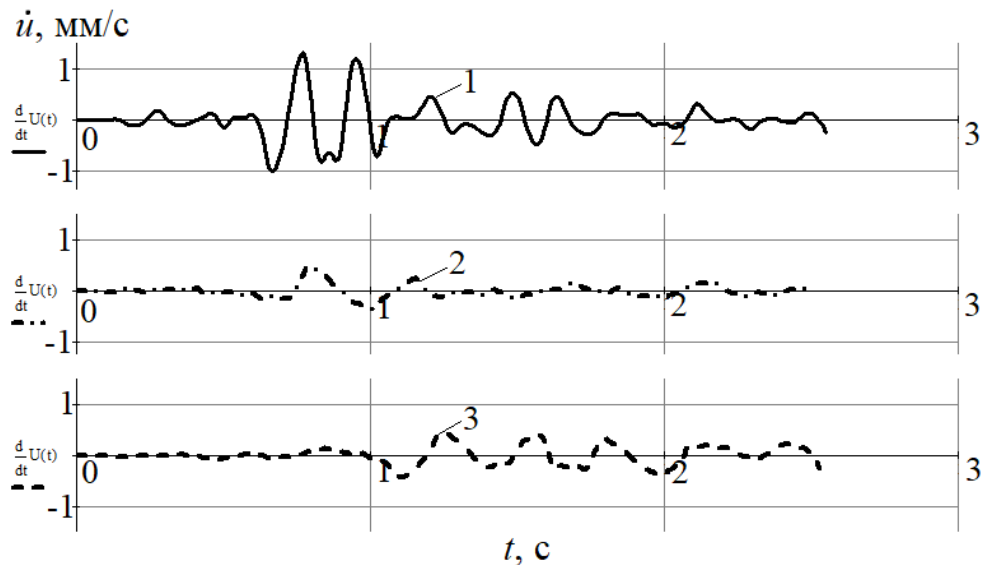


Рисунок 1 – Осцилограми вибухового імпульсу:

1 – швидкість зміщення частинок ґрунту на відстані 70 м від фундаменту; 2 – швидкість зміщення частинок на поверхні фундаменту; 3 – швидкість зміщення частинок на вершині однієї із силосних веж

Коефіцієнт коваріації показує своєю величиною ступінь взаємозв'язку між дискретними змінними. Автоковаріаційні функції мають згасаючий характер.

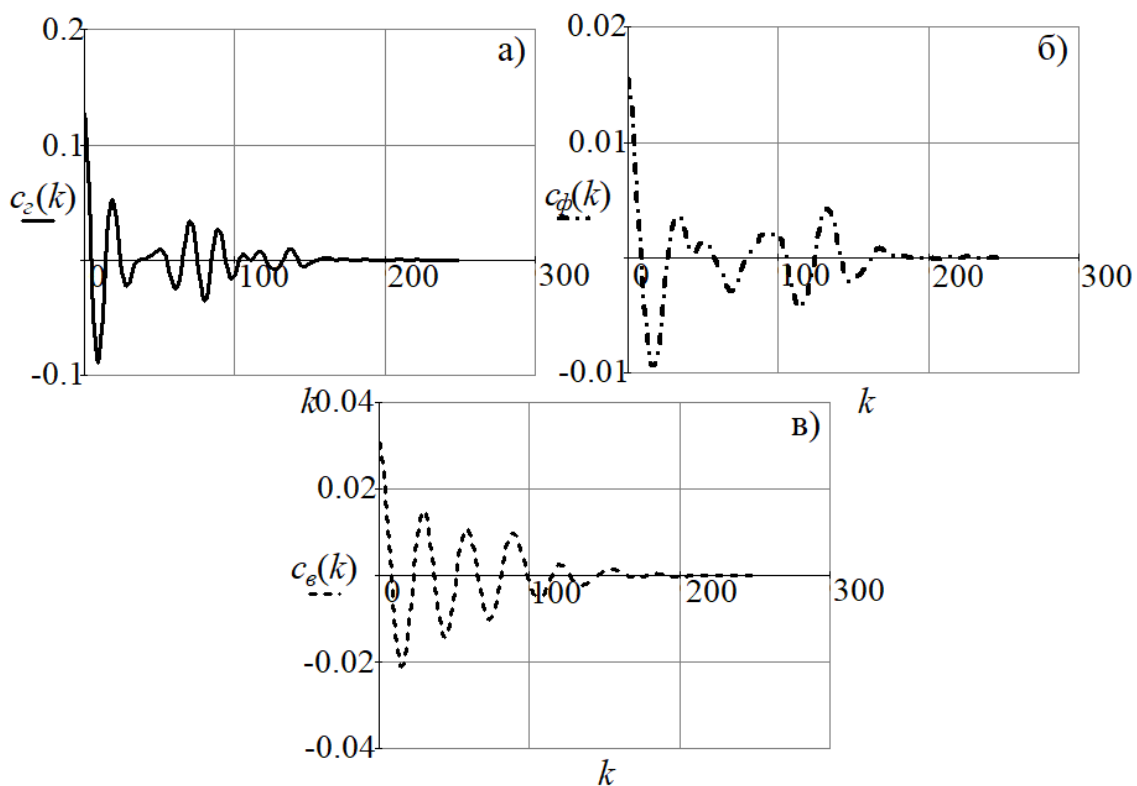


Рисунок 2 – Вибіркові оцінки автоковаріаційних швидкості зміщення частинок під дією вибухового імпульсу ґрунту на відстані 70 м від фундаменту (а), поверхні фундаменту (б) та вершини однієї з веж (в)

У вхідного та вихідного імпульсів, окрім взаємозв'язків між власними дискретними змінами існує і вплив один на одного. Для оцінки цієї сили взаємодії необхідно розрахувати коефіцієнт спільної коваріації [11] для системи «грунт – фундамент» (рис. 3) та «фундамент – вершина вежі» (рис. 4):

система «грунт – фундамент» -

$$c_{z\phi}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(i\&_{zt} - \overline{i\&_z})(i\&_{\phi t+k} - \overline{i\&_{\phi}})]; \quad (4)$$

$$c_{\phi z}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(i\&_{\phi t} - \overline{i\&_{\phi}})(i\&_{zt+k} - \overline{i\&_z})]; \quad (5)$$

система «фундамент – вершина вежі» -

$$c_{\phi\phi}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(i\&_{\phi t} - \overline{i\&_{\phi}})(i\&_{\phi t+k} - \overline{i\&_{\phi}})]; \quad (6)$$

$$c_{\phi z}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(i\&_{\phi t} - \overline{i\&_{\phi}})(i\&_{zt+k} - \overline{i\&_z})]; \quad (7)$$

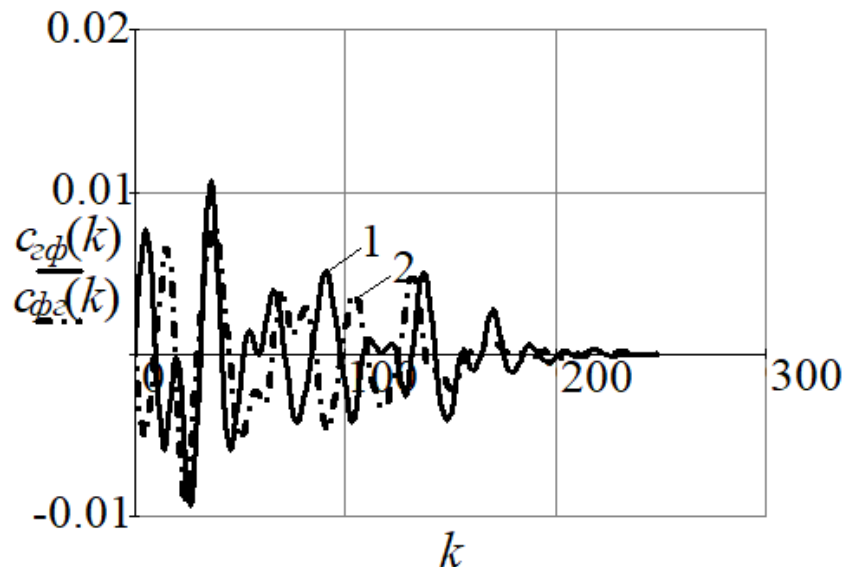


Рисунок 3 – Вибіркові оцінки спільних коваріаційних функцій для системи «грунт – фундамент»:

1 – вплив вхідного імпульсу на вихідний; 2 - вплив вихідного імпульсу на вхідний

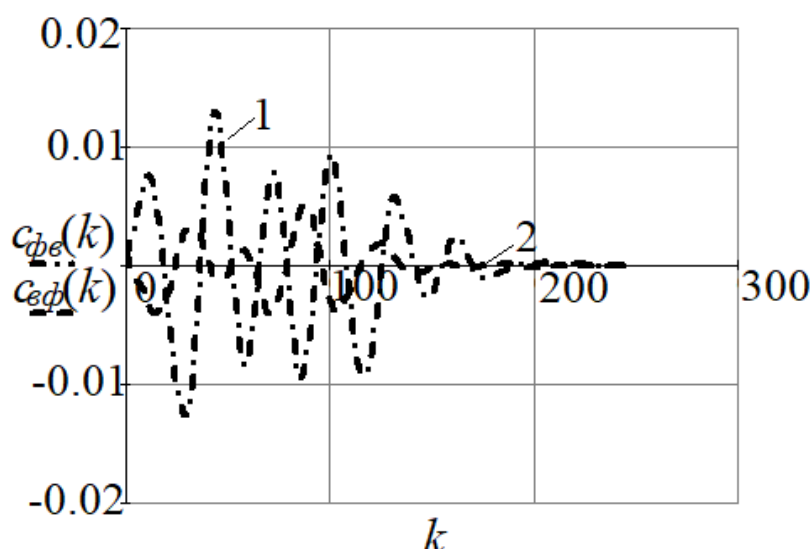


Рисунок 4 – Вибіркові оцінки спільних коваріаційних функцій для системи «фундамент – вершина везжі»:

1 – вплив вхідного імпульсу на вихідний; 2 - вплив вихідного імпульсу на вхідний

Вибіркова оцінка енергетичних автоспектрів $G_z(f)$, $G_\phi(f)$, $G_\theta(f)$ швидкості зміщення частинок під дією вибухового імпульсу розраховується за рівняннями 8-10 [11] та представлена на рис. 5 та 6.

$$G_z(f) = 2 \left[c_z(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot c_z(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right) \right]; \quad (8)$$

$$G_\phi(f) = 2 \left[c_\phi(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot c_\phi(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right) \right]; \quad (9)$$

$$G_\theta(f) = 2 \left[c_\theta(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot c_\theta(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right) \right]; \quad (10)$$

де f – частота сейсмічних коливань, Гц; $\omega_p(k)$ – коваріаційне вікно; L – ширина смуги частот коваріаційного вікна; $F = 2L$.

Для максимального збереження інформації при низькочастотних коливаннях в даній роботі використовується коваріаційне вікно Парзена [11]:

$$\omega_p(k) = \begin{cases} 1 - \frac{6k^2}{L^2} \left(1 - \frac{k}{L}\right), & 0 \leq k \leq \frac{L}{2} \\ 2 \left(1 - \frac{k}{L}\right)^3, & \frac{L}{2} \leq k \leq L. \end{cases} \quad (11)$$

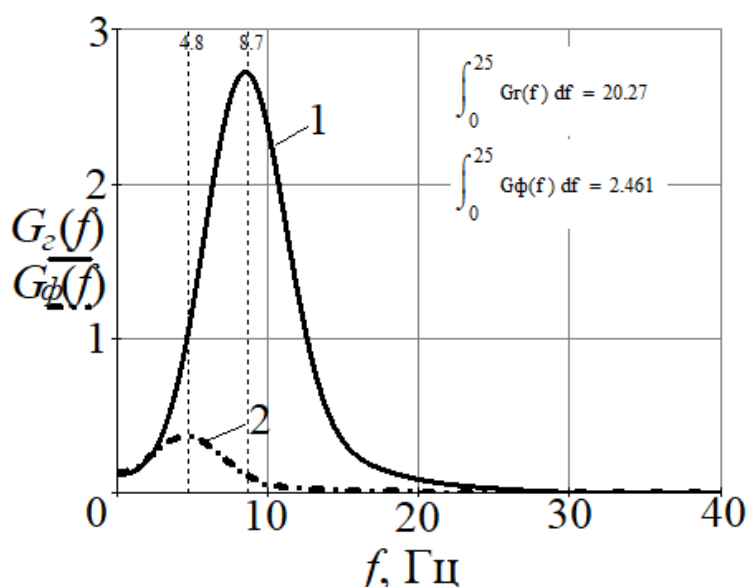


Рисунок 5 – Вибіркові оцінки енергетичних автоспектрів вхідного (1) та вихідного імпульсів (2) для системи «грунт – фундамент»

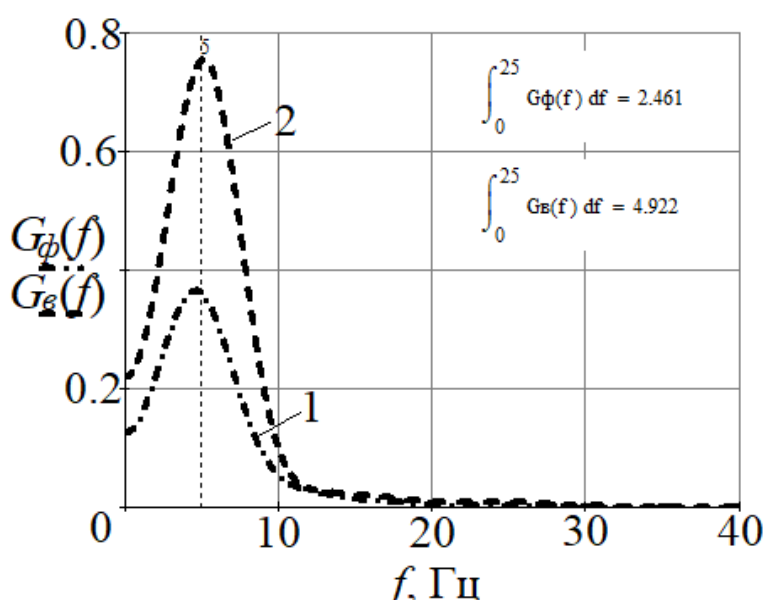


Рисунок 6 – Вибіркові оцінки енергетичних автоспектрів вхідного (1) та вихідного імпульсів (2) для системи «фундамент – вершина вежі»

До основних функцій фундаменту конструкцій відноситься зниження амплітуди та поглинання енергії сейсмічних коливань, які до нього підходять. Амплітуда сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) для системи «грунт – фундамент» в 7,35 нижча за амплітуду коливань ґрунту на відстані 70 м від дослідного об'єкта. Для аналізу дисипації енергії проінтегруємо рівняння 8-10 по частоті на діапазоні від 0 до 25 Гц. Аналіз отриманих результатів свідчить, що енергія на поверхні фундаменту нижча у 8,23 рази ніж на вході (поверхня ґрунту на відстані 70 м від фундаменту). Це свідчить про те, що фундамент дослідного об'єкта поглинув близько 88 % сейсмічної енергії, яка до нього підійшла.

Діапазон частот 5-9 Гц є резонансним. В цьому діапазоні, частота коливань фундаменту дослідного об'єкта близька до частоти коливань вхідного імпульсу, що

призводить до збільшення амплітуди та енергії сейсмічних коливань та утворені у фундаменті мікротріщин.

Для системи «фундамент – вершина вежі» амплітуда та енергія коливань на вершині вежі більша в 2 рази в порівнянні із поверхнею фундаменту. Даний факт свідчить про те, що за рахунок суттєвої висоти силосних веж (43 м), під дією вибухового імпульсу відбувається їх розкачування. Максимальна амплітуда коливань вершини вежі (0,754) та поверхні фундаменту (0,364) спостерігається на частоті 5 Гц. Це свідчить про те, що фундамент та вежі реагують на вибуховий імпульс як цілісний об'єкт.

Враховуючи те, що розповсюдження сейсмічних хвиль є багатовимірним та багатоімпульсним процесом, при подальших дослідженнях необхідно досліджувати взаємні спектральні характеристики (кросс-спектр). Кросс-спектральний аналіз є багатомірним узагальненням двовимірного випадку і зводиться до розрахунку двох спектральних функцій (Гренджер, Хатанака) [11]:

система «грунт – фундамент» -

$$L_{z\phi}(f) = 2 \left[l_{z\phi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot l_{z\phi}(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right) \right]; \quad (12)$$

$$Q_{z\phi}(f) = 4 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot q_{z\phi}(k) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right); \quad (13)$$

де $Q_{z\phi}(0) = Q_{z\phi}(F) = 0$.

система «фундамент – вершина вежі» -

$$L_{\phi\phi}(f) = 2 \left[l_{\phi\phi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot l_{\phi\phi}(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right) \right]; \quad (14)$$

$$Q_{\phi\phi}(f) = 4 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot q_{\phi\phi}(k) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot f \cdot k}{F}\right) \right); \quad (15)$$

де $Q_{\phi\phi}(0) = Q_{\phi\phi}(F) = 0$.

Для розрахунку ко-спектра та квадратурного спектра (рис. 7 та 8) необхідно із взаємної автоковаріаційної функції (рівняння 4-7) виділити парну та непарну складові:

$$l_{z\phi}(k) = \frac{1}{2} [c_{z\phi}(k) + c_{\phi z}(k)]; \quad (16)$$

$$l_{\phi\phi}(k) = \frac{1}{2} [c_{\phi\phi}(k) + c_{\phi\phi}(k)]; \quad (17)$$

$$q_{z\phi}(k) = \frac{1}{2} [c_{z\phi}(k) - c_{\phi z}(k)]; \quad (18)$$

$$q_{\phi\phi}(k) = \frac{1}{2} [c_{\phi\phi}(k) - c_{\phi\phi}(k)]; \quad (19)$$

де $q_{z\phi}(0) = 0$; $q_{\phi\phi}(0) = 0$.

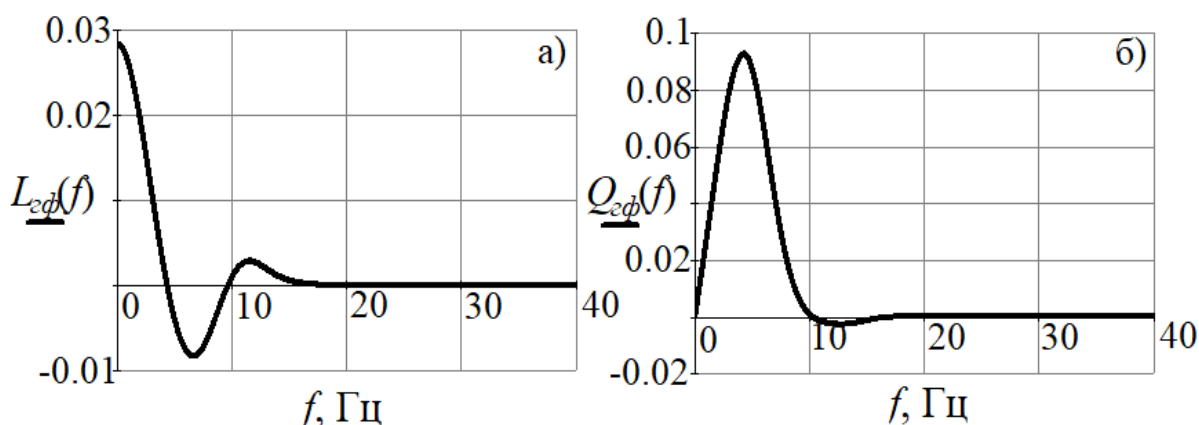


Рисунок 7 – Ко-спектр (дійсна складова взаємного спектра) (а) та квадратурний спектр (уявна складова взаємного спектра) (б) для системи «грунт – фундамент»

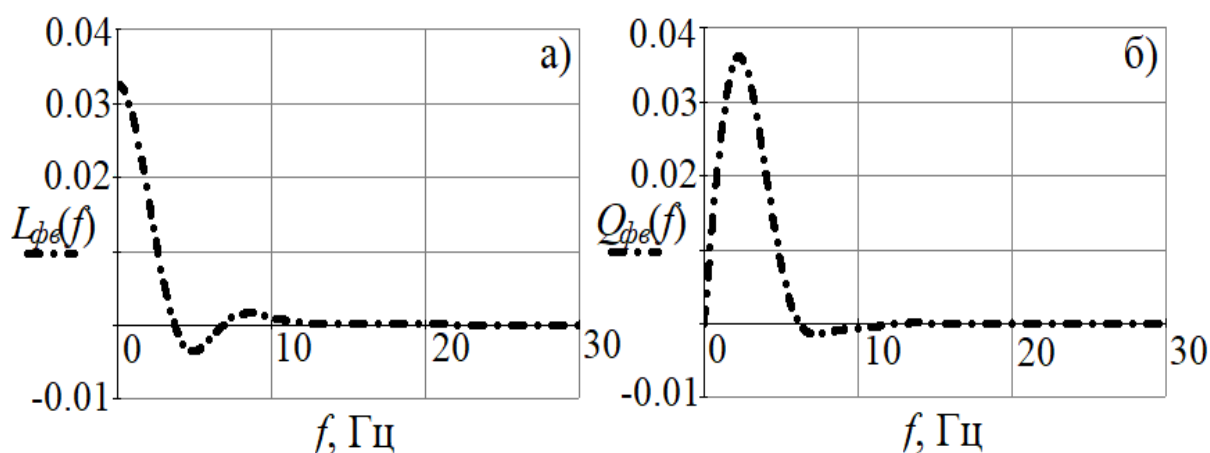


Рисунок 8 – Ко-спектр (дійсна складова взаємного спектра) (а) та квадратурний спектр (уявна складова взаємного спектра) (б) для системи «фундамент – вершина вежі»

Ко-спетр та квадратурний спектр дозволяє дослідити взаємну фазово-амплітудну характеристику (рис. 9).

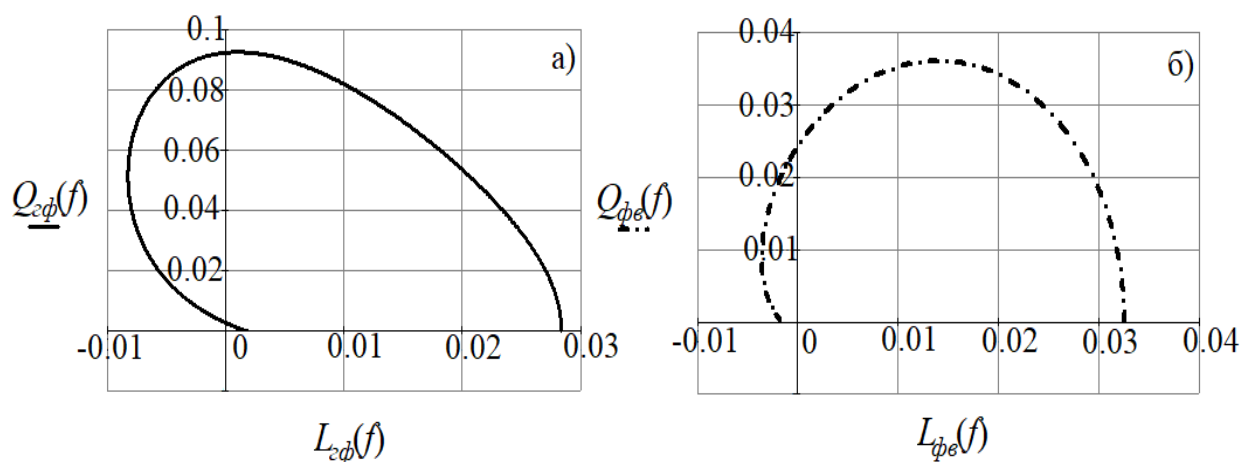


Рисунок 9 – Фазово-амплітудна характеристика взаємного спектра для системи «грунт – фундамент» (а) та системи «фундамент – вершина вежі» (б)

ВИСНОВКИ

1) Амплітуда сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) для системи «грунт – фундамент» в 7,35 рази нижча за амплітуду коливань ґрунту на відстані 70 м від дослідного об'єкта, енергія знизилася у 8,23 рази. Це свідчить про те, що фундамент дослідного об'єкта поглинув близько 88 % сейсмічної енергії, яка до нього підійшла. Основна частина енергії сейсмічних коливань для об'єкта, що досліджувався зосереджена в діапазоні частот від 0 до 25 Гц.

2) Діапазон частот 5-9 Гц є резонансним. В цьому діапазоні, частота коливань фундаменту дослідного об'єкта близька до частоти коливань вхідного імпульсу, що призводить до збільшення амплітуди та енергії сейсмічних коливань та утворення у фундаменті мікротріщин.

3) Для системи «фундамент – вершина вежі» амплітуда та енергія коливань на вершині вежі більша в 2 рази в порівнянні із поверхнею фундаменту. Даний факт свідчить про те, що за рахунок суттєвої висоти силосних веж (42,6 м), під дією вибухового імпульсу відбувається їх розкачування. Максимальна амплітуда коливань вершини вежі (0,754) та поверхні фундаменту (0,364) спостерігається на частоті 5 Гц. Це свідчить про те, що фундамент та вежі реагують на вибуховий імпульс як цілісний об'єкт.

4) Характер та форма фазово-амплітудних характеристик взаємних спектрів (годографи) вказує на те, що дослідна система «джерело вибуху-ґрунтовий масив-фундамент-силосні вежі» нестійка і частина енергії витрачається на утворення мікротріщин.

5) Використана в роботі методика досліджень характеристик гірського масиву та об'єктів, що охороняються, свідчить про можливість більш детального вивчення механізму розвитку мікротріщин та їх переходу до нестійкого руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Крючков, А. І., & Бахтин, А. І. (2019). Опис форми, розповсюдження та поглинання вибухового імпульсу в гірському масиві. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, № 23, 18-27. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.18-27
2. Крючков, А. І., & Бахтин, А. І. (2019). Умови формування хвилепроводу в багат шаровому гірському масиві. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, № 23, 39-46. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.39-46
3. Нагорный, В. П., & Денисюк, И. И. (2010). *Спектры и их приложения к задачам взрывного дела*. Киев: НАН Украины, Институт геофизики им. С.И. Субботина. ISBN 978-966-02-5675-0
4. Кравец, В. Г., & Денисюк, И. И. (1979). Амплитудно-частотный спектр импульса при действии взрыва в грунте. *Наук. думка: Динамика уплотнения грунтового массива взрывом*, 29-36.
5. Нагорный, В. П., Денисюк, И. И., & Рудюк, Я.А. (2009). Исследование циклического импульсного действия взрыва на горную породу с применением теории спектров. *Изв. вузов. Горн. журнал*, № 5, 85–88.
6. Вовк, А. А., & Кузьменко, А. А. (2001). Сейсмическое действие взрыва цилиндрического заряда. *Прикладная гидромеханика*, Т.3(75) № 4, 3-12.
7. Опарин, В. Н., Юшкин, В. Ф., Пороховский, Н. Н., Гришин, А. Н., Кулинич, Н. А., Рублев, Д. Е., & Юшкин, А. В. (2014). О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, 74-89.

8. Павлов, С. В. (2007). Применение вейвлет-анализа при обработке данных виброакустического метода контроля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3, 118-122.

9. Немирович-Данченко, М. М. (2013). Возможности обнаружения множественной трещиноватости сплошной среды на основе оценки спектральной плотности энергии отраженного сигнала. *Физическая мезомеханика*, № 16, 105-110.

10. Кабаков, В. А., Овсянников, П. И., & Помогов, И. Г. (1983). Сейсмическое действие взрывов на силосные башни Новокарагандинского цементного завода. *Горное дело: Сейсмика промышленных взрывов*, №85/42, 174-178.

11. Дженкинс, Г., & Ваттс, Д. (1972). *Спектральный анализ и его приложения*. Москва: Мир.

REFERENCES

1. Kriuchkov, A. I., & Bakhtyn, A. I. (2019). Opys formy, rozpovsiudzhennia ta pohlynannia vybukhovoho impulsu v hirskomu masyvi. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, № 23, 18-27. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.18-27

2. Kriuchkov, A. I., & Bakhtyn, A. I. (2019). Umovy formuvannia khvyleprovodu v bahatosharovomu hirskomu masyvi. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, № 23, 39-46. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.39-46

3. Nagorniy, V. P., & Denisyuk, I. I. (2010). *Spektry i ih prilozeniya k zadacham vzryivnogo dela*. Kiev: NAN Ukrainyi, Institut geofiziki im. S.I. Subbotina. ISBN 978-966-02-5675-0

4. Kravets, V. G., & Denisyuk, I. I. (1979). Amplitudno-chastotnyy spektr impulsa pri deystvii vzryiva v grunte. *Nauk. dumka: Dinamika uplotneniya gruntovogo massiva vzryivom*, 29-36.

5. Nagorniy, V. P., Denisyuk, I. I., & Rudyuk, Ya.A. (2009). Issledovanie tsiklicheskogo impulsnogo deystviya vzryiva na gornuyu porodu s primeneniem teorii spektrov. *Izv. vuzov. Gorn. zhurnal*, № 5, 85–88.

6. Vovk, A. A., & Kuzmenko, A. A. (2001). Seysmicheskoe deystvie vzryiva tsilindricheskogo zaryada. *Prikladnaya gidromekhanika*, T.3(75) № 4, 3-12.

7. Oparin, V. N., Yushkin, V. F., Porohovskiy, N. N., Grishin, A. N., Kulinich, N. A., Rublev, D. E., & Yushkin, A. V. (2014). O vliyanii massovogo vzryiva v karere stroitelnogo kamnya na formirovanie spektra seysmicheskikh voln. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, 74-89.

8. Pavlov, S. V. (2007). Primenenie veyvlet-analiza pri obrabotke dannykh vibroakusticheskogo metoda kontrolya. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, № 3, 118-122.

9. Nemirovich-Danchenko, M. M. (2013). Vozmozhnosti obnaruzheniya mnozhestvennoy treschinovatosti sploshnoy sredy na osnove otsenki spektralnoy plotnosti energii otrazhennogo signala. *Fizicheskaya mezomehanika*, № 16, 105-110.

10. Kabakov, V. A., Ovsyannikov, P. I., & Pomogov, I. G. (1983). Seysmicheskoe deystvie vzryivov na silosnyie bashni Novokaragandinskogo tsementnogo zavoda. *Gornoe delo: Seysmika promyshlennykh vzryivov*, № 85/42, 174-178.

11. Dzhenkins, G., & Vatts, D. (1972). *Spektralnyi analiz i ego prilozeniya*. Moskva: Mir.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2020.